



Computer method of modelling of the particles of different densit moving in the high-speed field of melt flows in the model three-dimensional object "Stand-pipe -slag catcher – mould" is offered. There are presented the results of calculations of dispensing of different densit slag particles proportion, localizing in curtain conditions in the area of stand-pipe, slag catcher and mould.

О. И. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОУЗОВ, В. Ф. СОБОЛЕВ,
Белорусский национальный технический университет

УДК 669.27:519

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ В ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Одним из важнейших вопросов, с которым сталкиваются инженеры-технологи при разработке литниково-питающих систем, является разработка размеров и положения элементов шлакоулавливания частиц различной плотности. Как известно, течение металла в системе «стояк – шлакоуловитель – форма» сопровождается образованием неметаллических включений, а также отслаиванием частиц формы в процессе теплового и гидравлического ударов о стенки формы. В результате этого поток расплава представляет собой гетерогенную смесь, состоящую из расплава и инородных частиц. При этом движение частиц в значительной степени повторяет движение расплава, однако имеет свои особенности, обусловленные силами Архимеда и сопротивления, действующими на частицу. Чтобы уменьшить влияние инородных частиц на формирование отливки, литниковые системы конструируют, используя так называемые элементы шлакоулавливания, которые «всасывают» инородные частицы, преграждая им путь в отливку. Основные методы расчета литниковых систем базируются на вычислениях отношений сечений стояка, шлакоуловителя и питателя [1, 2], которые получены на основе опыта для различных типов отливок. В то же время плотность частиц, их размеры, скорость движения практически не учитываются в расчетах, хотя размеры систем шлакоулавливания зависят и от них. В настоящее время практически нет общепризнанной теории движения инородных частиц в литниково-питающих системах, основанных на математических уравнениях физики. В данной работе развивается подход, основанный на фундаментальных уравнениях движения частиц, реализующийся с помощью компьютерных методов. Развитие компьютерной техники представляет новую возможность для анализа движения частиц в литниковых системах [3]. В частности, движение частицы может быть рассмотрено на основе уравнений движения Навье – Стокса с учетом особенностей плотности инородной частицы.

Цель настоящей работы – компьютерное моделирование движения частиц различной плотности в скоростном поле потоков расплава, рассчитанного с помощью уравнений Навье – Стокса.

В основу расчета движения частиц положена идея о том, что скорость частицы является суперпозицией скорости потока, описываемой уравнением Навье – Стокса расплава, и скорости частицы, возникающей в результате действия силы тяжести и архимедовой силы в условиях стабилизации движущегося потока. В этом случае движение частицы может быть описано уравнениями

$$\begin{cases} \vec{v}_q = \vec{v}_1 + \vec{v}_2, \\ m_q \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_A + m_q \vec{g}, \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{v}_q – скорость частицы в пространственной структуре, заполненной движущимся расплавом; \vec{v}_1 – компонента скорости, связанная с потоком расплава; \vec{v}_2 – компонента скорости, связанная с силой Архимеда и силой тяжести; m_q – масса частицы; \vec{F}_A – сила Архимеда.

Для определения скорости \vec{v}_1 использовали систему уравнений Навье – Стокса для движущейся жидкости [4] и уравнения Фурье – Кирхгофа для описания охлаждения движущегося потока [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \\ = \frac{1}{c(T)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right) + \frac{F(x, y, z, \tau)}{c(T(x, y, z, \tau))\rho}, \end{cases} \quad (2)$$

где τ – время; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); V_x, V_y, V_z – проекции скорости жидкости соответственно на координатные оси X, Y, Z ; $P(\tau)$ – давление жидкости; ρ – плотность жидкости; η – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения; T – температура.

Уравнения (2) дополняли следующими начальными и граничными условиями для скоростей и температур: $V_x(x, y, z, 0) = 0, V_y(x, y, z, 0) = 0, V_z(x, y, z, 0) = 0, V(x, y, z, 0) = 0, T_p(x, y, z, 0) = 700^\circ\text{C}, T_\phi(x, y, z, 0) = 20^\circ$, где T_p – температура расплава, T_ϕ – температура формы. На основе решения систем (1) и (2) была разработана программа моделирования движения частицы при движении расплава в сложной пространственной структуре. На рис. 1 показан интерфейс этой программы.

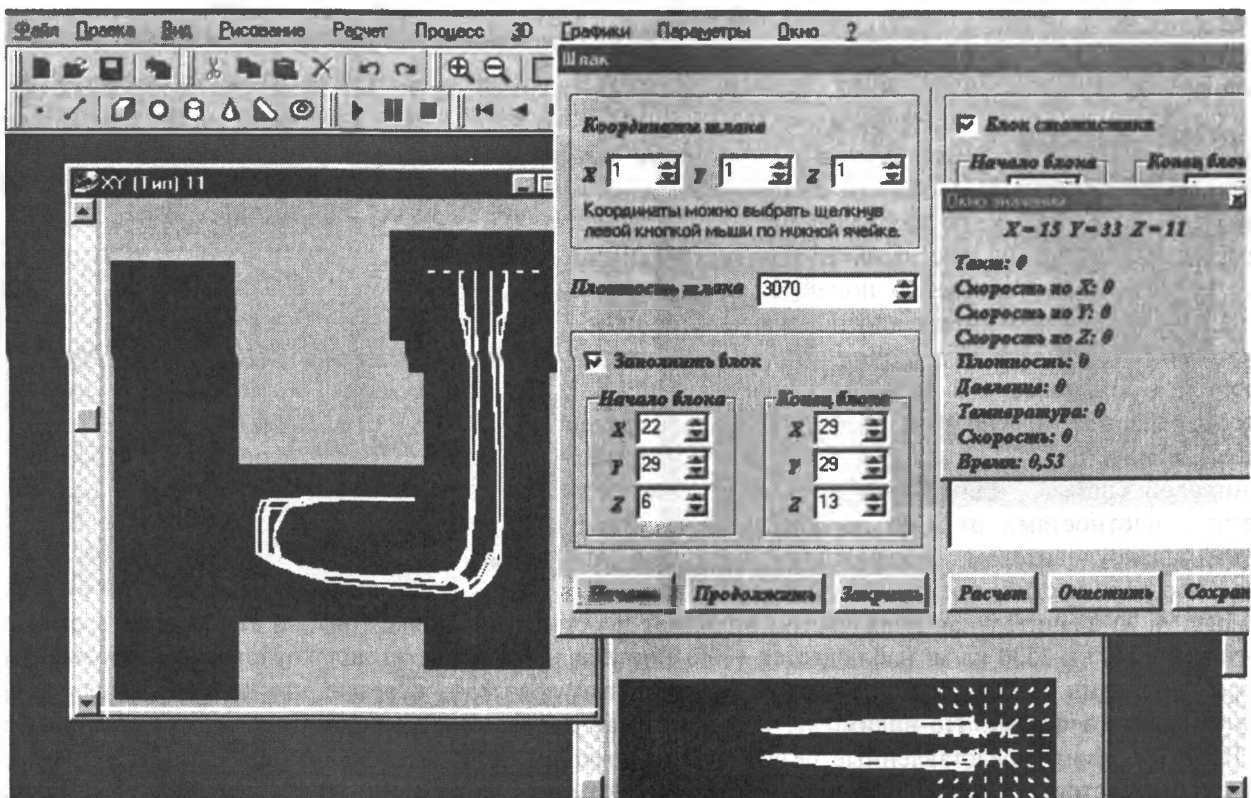


Рис. 1. Интерфейс программы для моделирования движения шлаковых частиц

В программе предусмотрена визуализация движения частицы, а также группы частиц, находящихся в заданном объеме. При этом можно анализировать попадание доли частиц в заданное, ограниченное плоскостями пространство. На рис. 2, а, б представлены результаты по визуализации движения частиц с плотностями $\rho = 1680 \text{ кг/м}^3$ и $\rho = 3070 \text{ кг/м}^3$ в алюминиевом расплаве АК12ч. В расчетах использовали следующие теплофизические характеристики: $\lambda = 170 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\eta = 0,0035 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, $\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$, $Q_{\text{крист.}} = 365 \text{ 000 Дж/кг}$, $T_{\text{сол.}} = 577^\circ\text{С}$, $T_{\text{ликв.}} = 590^\circ\text{С}$, которые были взяты для сплава АК12ч (алюминиевый сплав), и теплофизические свойства песчано-глинистой формы: $\rho_0 = 1680 \text{ кг/м}^3$, $C = 1050 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{С)}$, $\lambda = 0,34 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [6]. В качестве модельного объекта использовали трехмерную пространственную структуру «стояк – шлакоуловитель – форма» (рис. 3). Задавая различные плотности вероятностных частиц, которые могут находиться в расплаве (спектр частиц с плотностями от 2300 до 3700 кг/м^3), были установлены пространственные траектории групп частиц, заданных в объеме. На рис. 4 показаны центральные плоскости моделируемых объектов с различным положением систем шлакоулавливания для времени заполнения $\tau = 45 \text{ с}$. Как видно из рисунков, положение шлакоуловителя изменяет траекторию движения частиц. Подобные картины визуализации были получены для всех задаваемых плотностей частиц. В конечном состоянии анализировали долю частиц, попавших в прямоугольную область с координатами: $x_{\text{н}} = 24$, $y_{\text{н}} = 10$, $z_{\text{н}} = 8$, $x_{\text{к}} = 27$, $y_{\text{к}} = 24$, $z_{\text{к}} = 11$ (область стояка); $x_{\text{н}} = 4$, $y_{\text{н}} = 4$, $z_{\text{н}} = 8$, $x_{\text{к}} = 7$, $y_{\text{к}} = 27$, $z_{\text{к}} = 11$ (область отливки); три варианта положения шлакоуловителя: 1) $x_{\text{н}} = 19$, $y_{\text{н}} = 12$, $z_{\text{н}} = 8$, $x_{\text{к}} = 21$, $y_{\text{к}} = 14$, $z_{\text{к}} = 11$; 2) $x_{\text{н}} = 15$, $y_{\text{н}} = 12$, $z_{\text{н}} = 8$, $x_{\text{к}} = 17$, $y_{\text{к}} = 14$, $z_{\text{к}} = 11$; 3) $x_{\text{н}} = 11$, $y_{\text{н}} = 12$, $z_{\text{н}} = 8$, $x_{\text{к}} = 13$, $y_{\text{к}} = 14$, $z_{\text{к}} = 11$. В качестве области «запуска» шлаковых частиц использовали объем с координатами $x_{\text{н}} = 24$, $y_{\text{н}} = 15$, $z_{\text{н}} = 8$, $x_{\text{к}} = 27$, $y_{\text{к}} = 15$, $z_{\text{к}} = 11$ в области стояка. На рис. 5, а представлена зависимость влияния плотности движущихся частиц на их распределение в пространственной структуре «стояк – шлакоуловитель – форма», показанной на рис. 4, а. Как видно из гистограммы (рис. 5, а), частицы с плотностью $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$ и выше полностью попадают в форму, если они начинают свое движение от плоскости $y = 15$. Если частицы имеют плотность $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$, то около 63% их попадает в шлакоуловитель, а остальные оказываются в форме. При плотности $\rho = 2400$ и 2500 кг/м^3 63% частиц оказываются в форме, а остальные – в шлакоуловителе. Из рис. 5, б видно (положение шлакоуловителя смещено в сторону формы (см. рис. 4, б)), что картина распределения частиц в пространстве изменяется. Частицы с плотностями $\rho = 3400 \text{ кг/м}^3$ и выше в количестве 100% оказываются в форме при движении в литниковой системе. Для шлакоуловителя в этом случае имеется сложная зависимость – движение частиц с плотностями от 2300 до 2800 кг/м^3 постепенно приводит к максимальному улавливаю частиц шлакоуловителем, дальнейшее увеличение плотности от 2900 до 3300 кг/м^3 приводит к снижению доли частиц, попавших в шлакоуловитель. При положении шлакоуловителя вблизи питателя (см. рис. 4, в) значительная доля частиц влывает и остается в стояке (рис. 5, в). В то же время для плотностей 3400 и 3500 кг/м^3 наблюдается 100%-ное улавливание частиц шлакоуловителем. Повышение плотности частиц приводит к неэффективности шлакоуловителя, в результате чего значительная их доля попадает в форму. По-видимому, в этом случае необходим другой вариант шлакоулавливания.

Таким образом, представленные результаты иллюстрируют процесс движения частицы в трехмерной системе «стояк – шлакоуловитель – форма». Изменяя положение шлакоуловителя, его форму,

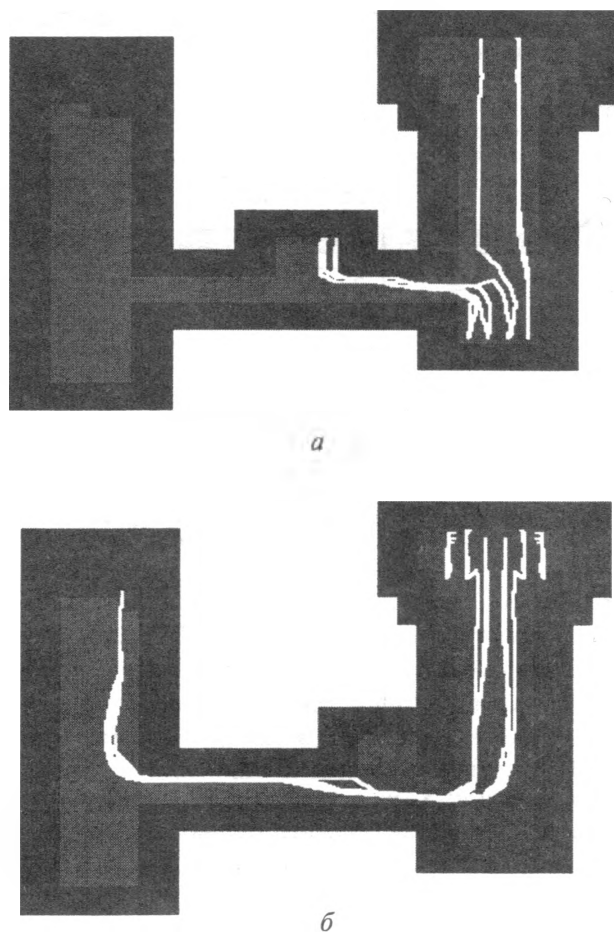
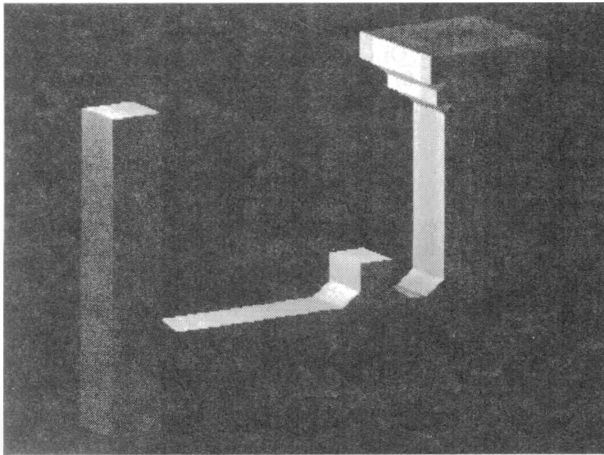
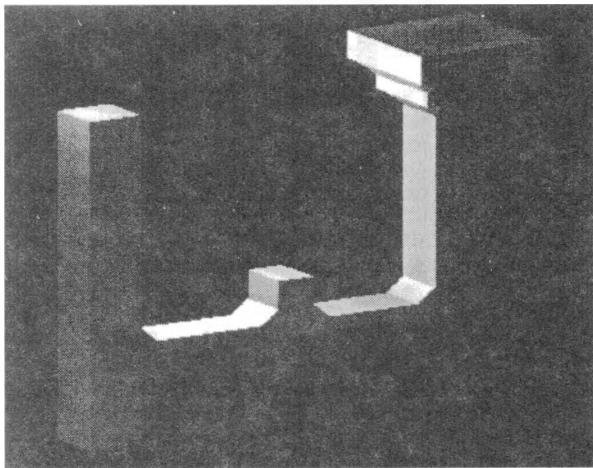


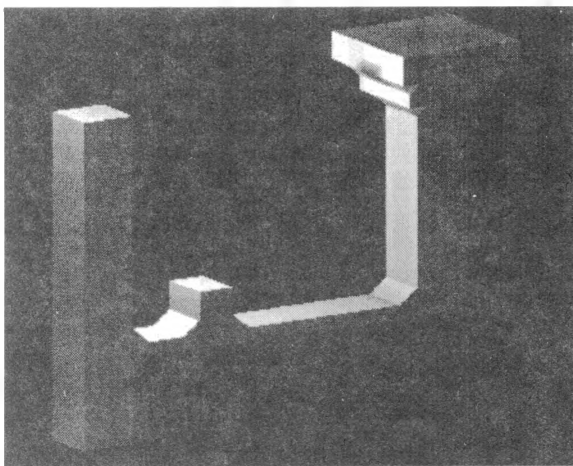
Рис. 2. Визуализация движения шлаковых частиц с плотностями $\rho = 1680 \text{ кг/м}^3$ (а) и $\rho = 3070 \text{ кг/м}^3$ (б) в алюминиевом расплаве АК12ч, движущихся в системе «стояк – шлакоуловитель – форма»



а

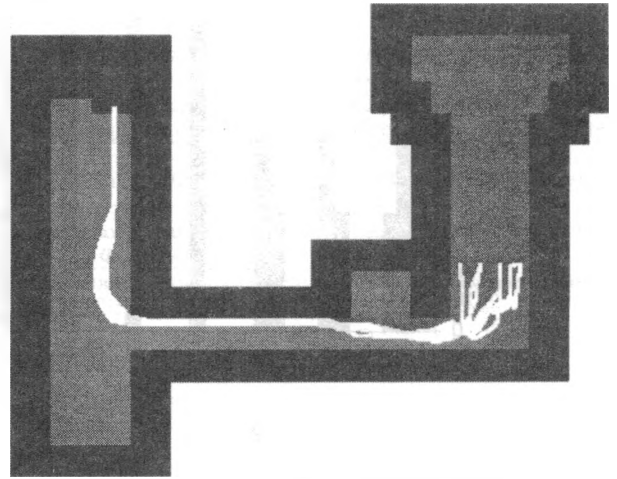


б

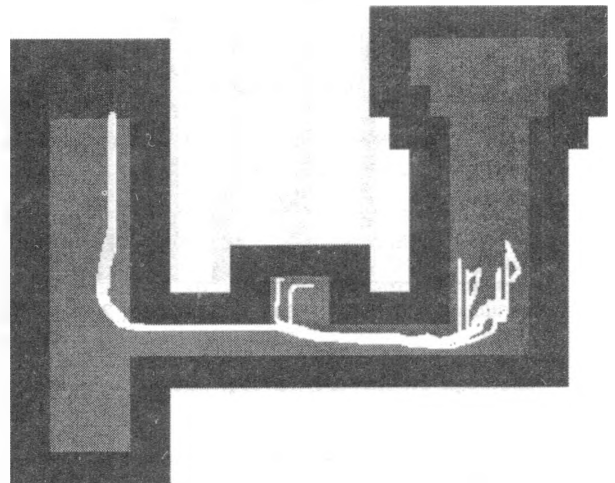


в

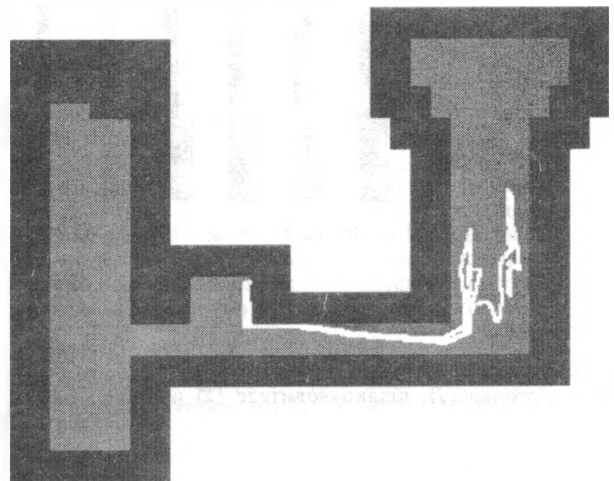
Рис. 3. Модели трехмерной пространственной структуры «стояк — шлакоуловитель — форма» с различными вариантами расположения шлакоуловителя



а

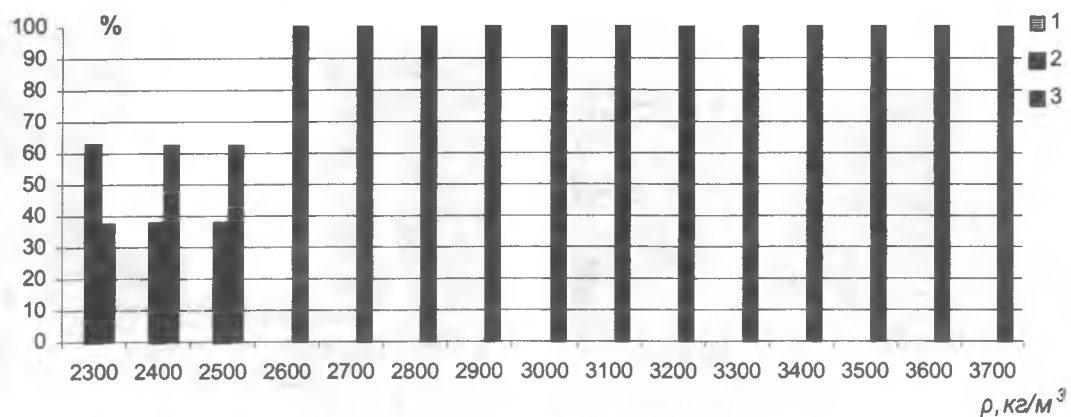


б

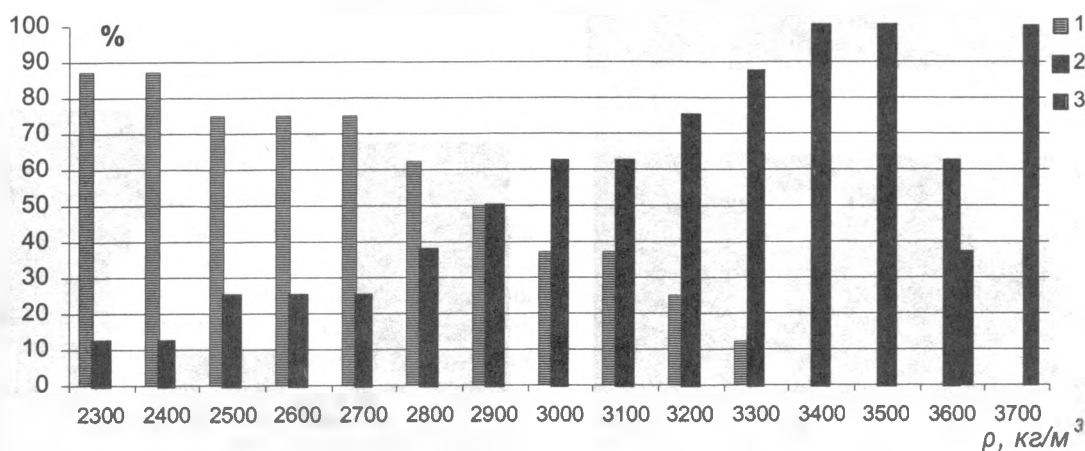


в

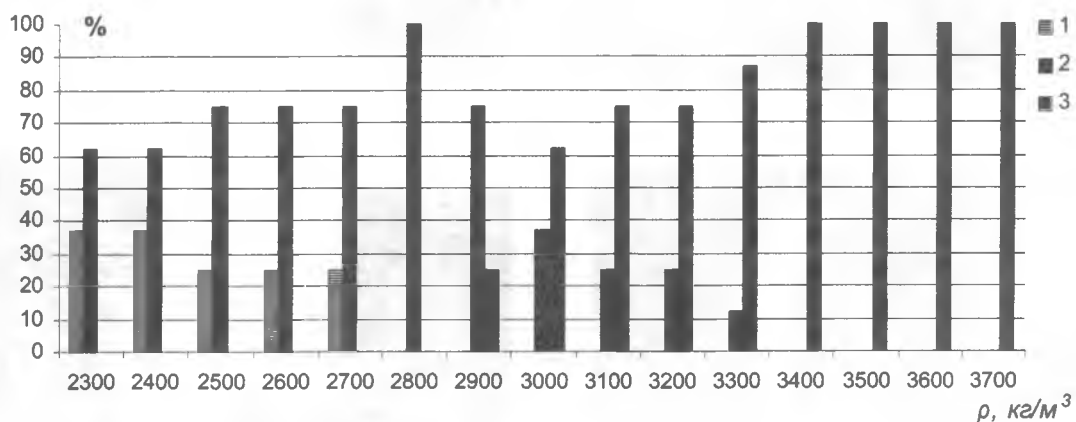
Рис. 4. Центральная плоскость моделируемых объектов с различным положением шлакоуловителей для времени заполнения $\tau = 45$ с



а



б



в

Рис. 5. Влияние плотности движущихся частиц в расплаве АК12ч на долю частиц, локализуемых в момент времени $\tau = 0,45$ с в стояке (1), шлакоуловителе (2) и в форме (3) (варианты гистограмм (а, б, в) соответствуют моделируемым объектам рис. 4, а, б, в)

их количество и положение в пространстве, можно теоретически рассмотреть различные варианты эффективности литниковой системы, выбранной технологом. Представленный метод планируется реализовать в виде модуля для компьютерной системы «ПроЛит», что позволит пользователям оптимизировать размеры конструктивных элементов литниково-питающей системы. В последующих работах планируется рассмотреть промышленные литниковые системы с точки зрения движения в них частиц различной плотности.

Литература

1. Галдин Н. М., Чистяков В. В., Шатульский А. А. Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок. М.: Машиностроение, 1992.
2. Рабинович Б. В. Литниковые системы для чугунных отливок. М.: Изд-во "Московская правда", 1958.
3. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф. Компьютерный метод расчета питателя литниковой системы // Литейное производство. 1998. № 10. С. 34 – 35.
4. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т.45, №4. С. 110 – 114.
5. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Тепловая модель расплав-зародыш и исследование характеристик переходной зоны под влиянием электронного строения 3d-элементов в алюминии // ИФЖ. 1999. Т.72, №4. С. 792 – 796.
6. Чичко О. И., Соболев В. Ф. О новых методах анализа скоростных потоков расплавов для систем автоматизированного моделирования литейных процессов // Литье и металлургия. 2002. № 2. С. 42 – 46.



02.03 – 14Г.19. Крупнейший в Латинской Америке литейный завод. Le partenariat TUPY-SNECI: Une vraie solution pour les construteurs francais.

Meric Christian. Hommes et fonderie. 2001, № 314, с. 76–78, 2 ил. Фр.

Крупнейший в Латинской Америке литейный завод ком. Туру (Бразилия) имеет проектную мощность 450 тыс. т чугуна, предназначенного для автомобилестроения. В 1999 г. выпуск отливок составил 236 тыс. т, в 2000 – 278 тыс. т. Из этого количества – 50% предназначено на экспорт; 55% от общего объема литья приходится на головки и блоки цилиндров. Для ряда отливок применяется первичная механическая обработка. На предприятии занято 4500 чел. В целях уменьшения нагрузки на окружающую среду завод имеет 2 филиала – в Сан-Паулу в Жуанвилле.

02.03 – 14Г.21. Повышение квалификации специалистов в области электросталеплавильного производства.

Электросталеплавильное производство. 2001, № 5, С. 45. Рус.

12–16 марта 2001 г. на учебной базе Центрального межведомственного института повышения квалификации специалистов (ЦМИПКС) Минобразования России состоялось четвертое занятие постоянно действующего семинара "Современная электросталеплавильное производство". Тема занятий "Электросталеплавильные комплексы: технологические, проектные и инвестиционные решения для действующих и новых заводов" привлекла 21 слушателя – работников 9 заводов, где проводятся или намечены мероприятия по модернизации сталеплавильного производства путем использования современных решений в области разработки конструкции оборудования, технологии, автоматизации и экологии. Программа семинара включала выступления ведущих специалистов.

02.03 – 14Г.22. Восполнение кадров инженерно-технических работников в литейном производстве. Fehlender Ingenieurwachstuch in der Gieberei – Jammern oder Handeln?

Scheel Burghard. Giesserei Rdsch. 2001. 48. № 5–6. с. 6–10. 16 ил. Нем.

Представляются структура и краткий обзор деловой активности акционерного общества Rautenbach, являющегося одним из ведущих поставщиков литых изделий для моторо- и автомобилестроения и разработчиком новых способов литья. Анализируются стратегические цели акционерного общества и отмечается тесная связь между их реализацией и надлежащей подготовкой молодых кадров инженерно-технических работников. Рассматриваются особенности используемой акционерным обществом системы подготовки и повышения квалификации инженерно-технических работников среднего и высшего звена.

02.01 – 14Г.22П. Способ производства чугуна с вермикулярным графитом для блока цилиндров. Method of manufacturing a compacted vermicular graphite cast iron for engine block: Заявка 1111071 ЕПВ, МПК⁷ С 21 С 1/08.

Hyundai Motor Co., Park Hyoun Soo, Kim Hak Jin, Kim Jong Moon, Jung Seung Cheal (Merkle, Gebhard Ter Meer Steinmeister & Partner GbR, Patentanwälte, Mauerkircherstrasse 45 81679 Munchen (DE)). № 00123556.3; Заявл. 27.10.2000; Оpubл. 27.06.2001; Приор. 22.12.1999, № 9960345 (Корея Республика). Англ.

Показано, что при охлаждении расплава из чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) от 1500 до 1350–1420°C скорость снижения Mg в ЧВГ составляет 0,001 %/мин. Предложен способ производства ЧВГ, содержащего Fe, С, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Cu, Sn, а также 0,020–0,028 мас. % Mg (в расплаве ЧВГ), который предусматривает компенсацию потерь содержания Mg в ЧВГ. Приведены свойства ЧВГ.